

確率論的震源モデルによる強震動のシミュレーション

宮崎大学大学院 学生員 田中 剛
 (株)日本技術開発 正員 田村 好文
 宮崎大学工学部 正員 原田 隆典

1. まえがき 震源特性を振動数-2乗モデルとした確率論的震源モデルと表層地盤の増幅特性をモデル化した金井・田治見スペクトルを組み合わせて、確率論的地震動のスペクトルモデルを提案した。このモデルは、低振動数領域における金井・田治見スペクトルの欠陥点である変位スペクトルの発散問題(金井・田治見スペクトルの変位スペクトルは低振動数領域において無限大の値を持ち物理的条件に反する。)を解決している。この確率論的地震動のスペクトルモデルと不規則振動理論における不規則波形のスペクトル表記法を組み合わせ、モデルから与えられるスペクトル特性を有する地震動の計算方法を示す¹⁾。

2. 方法の概要 非定常確率波 $a(t)$ は非定常パワースペクトル $S_{aa}(t, \omega)$ を用いて計算することができる。

$$a(t) = \sqrt{2} \sum_{j=1}^{N_\omega} \sqrt{2S_{aa}(t, \omega) \Delta\omega} \cos(\omega t + \phi_j); \quad \omega_j = j\Delta\omega; \quad \Delta\omega = \frac{\omega_u}{N_\omega}; \quad j = 1, 2, \dots, N_\omega \quad (1)$$

ここに、 ω_u は振動数の上限値で、これ以上の振動数では非定常スペクトルの振幅が数学的または物理的理由から十分に小さく、零とみなされる振動数である。式(1)において、 ϕ_j は $(0, 2\pi)$ の間で一様分布を持つ互いに独立な不規則位相角である。式(1)の確率波は、中心極限定理によると N_ω が大きくなると漸近的にガウス分布に従う非定常確率波となる。式(1)において地盤加速度の非定常パワースペクトル S_{aa} は、次のように与えられるものとする。

$$S_{aa}(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} |W(t, \omega)|^2 |A(\omega)|^2; \quad |A(\omega)| = C A_S(\omega) A_D(\omega) A_A(\omega) \quad (2)$$

ここに、 $|W(t, \omega)|$ は、定常パワースペクトルから非定常パワースペクトルを定義する修正関数である。 $|A(\omega)|$ は、地震モーメント M_0 の断層から距離 R の観測点でのせん断波のフーリエスペクトル振幅である²⁾。 C 、 $A_S(\omega)$ 、 $A_D(\omega)$ 、 $A_A(\omega)$ は、それぞれ、振幅定数、震源スペクトル、地震波の減衰特性、および表層地盤の増幅特性を表す係数である。振幅定数と震源スペクトルは次式で与えられる。

$$C = \frac{R(\theta, \varphi) F V}{4\pi \rho C_S^3}; \quad A_S(\omega) = \frac{M_0 \omega^2}{1 + (\omega/\omega_C)^2} \quad (3)$$

ここに、 $R(\theta, \varphi)$ は、震源からの地震波の放射パターンに対する平均補正係数、 F は自由表面の影響による波動の増幅補正係数、 V は2方向の水平成分のエネルギー分配を説明する低減係数である。 ρ は媒質の密度、 C_S は媒質のせん断波速度である。 ω_C はコーナー振動数である。減衰特性係数と表層地盤による地震波の増幅特性は次式で与える。

$$A_D(\omega) = \frac{1}{1 + (\omega/\omega_{max})^n} \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\omega R}{2Q C_S}\right); \quad A_A(\omega) = \frac{\sqrt{1 + 4h_g^2(\frac{\omega}{\omega_g})^2}}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_g})^2)^2 + 4(h_g^2)(\frac{\omega}{\omega_g})^2}} \quad (4)$$

ここに、 $A_D(\omega)$ の式において右辺第1項は、地震波の高振動数 ω_{max} を遮断するフィルターを表す。ここでは、 $n = 1$ を仮定する。右辺第2項は、せん断波の幾何学的減衰特性を表す。右辺第3項は、地震波のエネルギーが地殻や地盤材料の非弾性的性質により消費される材料減衰 Q の効果を表す。本研究において表層地盤による地震波の増幅特性 A_A は、金井・田治見スペクトルを採用する。 ω_g は表層地盤の卓越振動数、 h_g は増幅率を制御するパラメータである。硬い地盤では、 $\omega_g = 15.6(\text{rad/sec})$ 、 $h_g = 0.6$ が用いられる。式(2)の修正関数 $|W(t, \omega)|$ は、Kimura and Kameda(1970)³⁾ による非定常スペクトルモデルを簡略式で近似化した次式を用いるものとする。

$$|W(t, \omega)| = \frac{e^{-(c_1\omega + c_2)t} - e^{-(c_3\omega + c_4)t}}{e^{-(c_1\omega + c_2)t^*} - e^{-(c_3\omega + c_4)t^*}}; \quad t^* = \frac{\ln(c_1\omega + c_2) - \ln(c_3\omega + c_4)}{(c_1\omega + c_2) - (c_3\omega + c_4)} \quad (5)$$

ここに、

$$\begin{aligned} c_k &= [(a_{k1}\Delta - a_{k2})M + a_{k3} - a_{k4}\Delta] \times a_{k5}; a_{11} = a_{31} = 6.0; a_{12} = a_{32} = 1600.0; \\ a_{13} &= 14000.0; a_{14} = a_{34} = 54.0; a_{15} = a_{35} = 10^{-6}; a_{21} = a_{41} = 4.0; a_{22} = a_{42} = 1000.0; \\ a_{23} &= 9500.0; a_{24} = a_{44} = 36.0; a_{25} = a_{45} = 10^{-4}; a_{33} = 15000.0; a_{43} = 9510.0 \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 M は地震のマグニチュード、 Δ は震央距離を表す。

金井・田治見スペクトルは、基盤における加速度波形のスペクトル振幅が振動数に依存しないで一定であるとして、 $A_A(\omega)$ に定数を乗じたものである。従って、もともとの金井・田治見スペクトルから定義される速度波形および変位波形のスペクトル振幅は、低振動数では、それぞれ、振動数および振動数の2乗に逆比例する。このようなことは物理的にはありえない。しかし、本研究で求めたように、震源スペクトル特性、地震波の伝播による減衰特性、および表層地盤の増幅特性、という地震動の物理に基づく、上記のような金井・田治見スペクトルにおける低振動数領域の物理的に不都合な特性が改良される。

3. 数値計算例 確率論的震源モデルによる $M=5$ と 7 の地震において震源距離 $R=20\text{km}$ の観測点での地盤加速度特性の具体的形状を数値計算例によって示す。計算では以下の数値を用いた。震源距離 $R_0=20\text{ km}$ 、震央距離 $\Delta=17.32\text{ km}$ 、 $\Delta t=0.01\text{ sec}$ 、 $\omega_u=2\pi \times 50\text{ rad/sec}$ 、 $N_\omega=1024$ 。シミュレーションに当たり次の値を用いた。

$$R(\theta, \varphi) = 0.63; F = 2.0; V = 0.5; \rho = 2.7\text{gr/cm}^3; C_S = 3.6\text{km/sec} \quad (7a)$$

$$\omega_c = 7.07\text{rad/sec}; \omega_{max} = 66.4\text{rad/sec} \quad (7b)$$

$$Q = 10(q_1 \log(\omega/2\pi) + q_2); q_1 = 0.64; q_2 = 2.1; \omega_g = 5.56\text{rad/sec}; h_g = 0.6 \quad (7c)$$

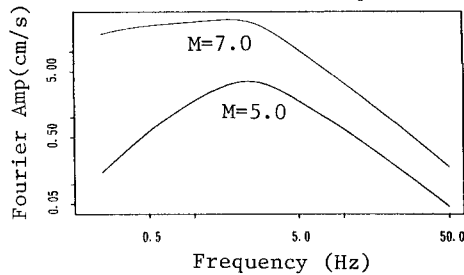


図1. $M=5$ と 7 の加速度スペクトル振幅

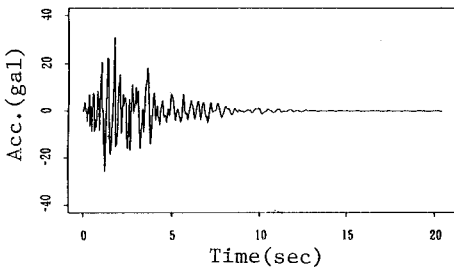


図2. $M=5$ の加速度波形の例

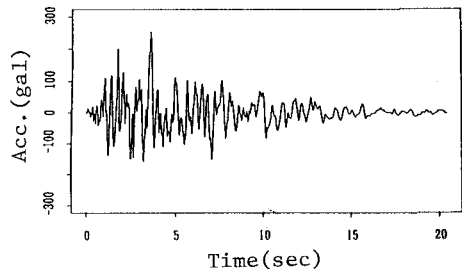


図3. $M=7$ の加速度波形の例

図1は、 $M=5$ と 7 の加速度フーリエスペクトル振幅を表す。マグニチュードが大きいかほど低振動数のスペクトル値が大きい。図2、図3は式(1)より計算された加速度波形のサンプル例である。図2と図3を比較するとマグニチュードが大きいかほど低振動数の振幅が大きく継続時間も長いことが読みとれる。

4. まとめ 理論的に強震動を予測する観点から、震源特性を考慮した確率論的地震動モデルを開発している。確率論的地震動モデルでは、ある特定の観測点における加速度波形の一つ一つは違うが、その平均的なスペクトル特性は震源特性や観測点の地盤条件から決まるスペクトル特性を持つ。したがって、確率論的地震動モデルは、構造物の建設サイトにおける平均的な強震動を予測するために適している。なお、モデルに含まれる各種パラメータの値は観測値等からより現実的なものにしてゆかなければならない。

参考文献 1) Shinozuka, M., Deodatis, G., and Harada, T., Digital Simulation of Seismic Ground Motion, Stochastic Approaches in Earthquake Engineering, Edited by Lin, Y.K., and Minai, R., Springer-Verlag, 1987, p.252-298. 2) Hanks, T.C., and McGuire, R.K., The Character of High-Frequency Strong Ground Motion, Bull. of Seism. Soc. of Am., Vol.71, 1981, pp.2071-2095. 3) 木村淳二、亀田弘行、地盤の非線形増幅を考慮した地震動の応答スペクトルのアペニュエーション特性に関する不規則振動解、京都大学耐震研究報告 No.87-2, 1987.